DOI: 10.22067/jmme.2021.58889.0

تأثیر نانوذرات رس و نانولولهٔ کربنی بر خواص کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه*

مقاله پژوهشی

فؤاد جاودانه[۱] آرمان صدقی[۲] فرانک فرهادی نیا[۳]

چکیده *کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه یکی از انواع کامپوزیت‌ها است که در سال‌های اخیر به‌دلیل خواص خوب و قیمت تمام‌شدهٔ پایین مورد توجه قرار گرفته‌است. استحکام خمشی نسبتاً پایین و احتمال برش بین لایه‌ای بالا، از مواردی است که کاربرد کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه را محدود کرده است. تحقیقات زیادی برای شناسایی روش‌های بهبود خواص این کامپوزیت و در نتیجه افزایش دامنهٔ کاربردهای آن، به‌ویژه از طریق ساخت کامپوزیت هیبرید با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به زمینه انجام شده‌است. در این میان نانوذرات رس و نانولوله‌های کربنی به‌دلیل عملکرد مناسب در زمینهٔ اپوکسی به‌عنوان تقویت‌کننده، مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزودن این ذرات هرچند سبب بهبود خواص کامپوزیت شده اما عموماً روش‌های تولید پیشنهادی، سبب افزایش هزینهٔ تولید این کامپوزیت شده و این تحقیقات، عملاً نتیجه‌ای درخور برای صنعت به‌همراه نداشته‌اند. در این تحقیق نانورس و نانولولهٔ کربنی به‌وسیلهٔ روش اختلاط مکانیکی با همزن مکانیکی ساده با سرعت rpm ۴۰۰-۳۰۰ به زمینهٔ اپوکسی اضافه شده و تغییرات استحکام خمشی و برشی بین لایه‌ای کامپوزیت‌های هیبرید و کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، افزایش نانوذرات رس به زمینهٔ کامپوزیت سبب افزایش استحکام خمشی می‌شود و بیشترین میزان افزایش استحکام خمشی حدود ۲۵٪ و مربوط به نمونهٔ حاوی ۰٫۵٪ نانورس نسبت‌به نمونهٔ بدون نانوذرات رس است. استحکام برشی بین لایه‌ای نیز با افزودن ۲٪ نانورس به‌میزان ۵٪ افزایش یافته‌است. با این وجود افزودن نانولولهٔ کربنی در این روش تولید، تأثیری معکوس بر خواص داشت.*

واژه‌های کلیدی کامپوزیت هیبرید، اپوکسی/الیاف شیشه، استحکام برشی، برش بین لایه‌ای، نانوذرات رس، نانولولهٔ کربنی.

مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها جایگزین بسیار مناسبی برای مواد معمول فلزی و پلیمری به‌شمار می‌روند و حتّی در بسیاری موارد عملکردی بهتر هم دارند. مهم‌ترین دلیل برتری کامپوزیت‌ها در بسیاری موارد سبک‌تر، مستحکم‌تر و ارزان‌تر بودن آن‌ها نسبت‌به مواد معمول است. کامپوزیت‌ها به‌صورت عمومی برای ساخت پل‌ها، ساختار بدنهٔ قایق‌ها، پنل‌ها یا استخرهای شنا، بدنهٔ ماشین‌های مسابقه، حمام‌ها و مخازن ذخیره‌سازی، کاربردهای نیازمند مقاومت به سایش و وزن کم و... مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. کامپوزیت‌ها را می‌توان به سه دستهٔ کامپوزیت‌های با ذرات تقویت‌کننده، کامپوزیت‌های با الیاف تقویت‌کننده و کامپوزیت‌های ساختاری (لایه‌ای و ساندویچ پنل) تقسیم‌بندی کرد [2].

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری موادی هستند که الیاف یا ذرات تقویت‌کننده در یک زمینه از جنس پلیمر قرار گرفته‌اند و درنتیجه ماده‌ای با خواصی فیزیکی و مکانیکی ایجاد می‌شود که هیچ‌کدام از مواد مورد استفاده به‌عنوان زمینه یا تقویت‌کننده‌ها، به‌تنهایی دارا نیستند [3]. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری خواص بسیار خوب شیمیایی و مقاومت دربرابر خوردگی را دارا هستند. استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها به‌دلیل وزن سبک، استحکام بالا و قابلیت ساخت شکل‌های پیچیدهٔ آیرودینامیکی در صنعت حمل‌ونقل سبب کاهش هزینه‌های مصرف سوخت شده‌است. هم‌چنین مقاومت به خوردگی خوب این نوع کامپوزیت‌ها و هزینهٔ تولید پایین آن‌ها سبب کاهش قیمت ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری به‌دلیل افزایش عمر مفید قطعات شده‌است [4].

در کامپوزیت‌ها پیو ستگی اجزا تو سط فاز زمینه تأمین

*تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۳/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۵/۱۵ می‌باشد.
(۱) کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانش‌آموختهٔ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه.
(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین.
(۳) کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانش‌آموختهٔ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین.
Email: sedghi@eng.ikiu.ac.ir

می‌شود. فاز زمینه باید ویژگی‌های ذیل را دارا باشد:

۱. پایداری شکل و اندازهٔ قطعه را فراهم کند.
۲. امکان توضیع مناسب تقویت‌کننده‌ها را فراهم آورد.
۳. تحت اعمال بارگذاری مکانیکی و یا اعمال حرارت تا محدودهٔ تعیین‌شده برای کارکرد قطعه، پایدار بماند و دربرابر تغییرات شکلی مقاومت کند.
٤. بار اعمالی در حین عملکرد را به تمامی اجزای تشکیل‌دهندهٔ کامپوزیت شامل ذرات و الیاف تقویت‌کننده انتقال دهد.
٥. متناسب با محیط کاری قطعهٔ ساخته شده، دارای پایداری شیمیایی و فیزیکی مناسب باشد.

بر این اساس به‌منظور انتخاب مواد مورد استفاده برای ساخت کامپوزیت‌ها، باید براساس محل استفاده و شرایط کاری مورد انتظار قطعات تولیدی، موارد ذیل مشخص شود:

۱. سختی و ویژگی‌های تک‌فازی.
۲. استحکام باتوجه به شرایط بارگذاری حرارتی و مکانیکی مدنظر.
۳. میزان کرنش در یک تنش مشخص.
٤. میزان پایداری مواد در شرایط کاری مورد نظر.

باتوجه به موارد مشخص‌شده در خصوص شرایط کاری، می‌توان مواد مورد نیاز را درجهت ساخت کامپوزیت‌ها انتخاب نمود. یک پلیمر برای استفاده به‌عنوان زمینهٔ یک کامپوزیت باید ویژگی‌های ذیل را دارا باشد:

۱. در دمایی کمتر از دمای ذوب، تجزیهٔ حرارتی یا دمای بی‌نظم شدن ساختاری الیاف تقویت‌کننده، میزان خیس شدن الیاف در پلیمر زمینه مناسب باشد.
۲. زمینه نباید با ذرات یا الیاف تقویت‌کننده واکنش شیمیایی بدهد.
۳. قابلیت اتصال مناسب و قوی بین تقویت‌کننده‌ها و زمینه وجود داشته باشد.
٤. امکان قالب‌گیری و شکل‌دهی قطعات در دمایی که تجزیهٔ حرارتی و شکست مکانیکی تقویت‌کننده‌ها رخ ندهد و هم‌چنین توزیع تقویت‌کننده‌ها یکنواخت باقی بماند [5].

از میان پلیمرهای مورد استفاده به‌عنوان زمینهٔ کامپوزیت‌های پلیمری، رزین اپوکسی به‌دلیل خواص خود از مهم‌ترین مواد به‌شمار می‌رود. رزین اپوکسی یک پلیمر ترموست است که نسبت هزینه به عملکرد بسیار پایینی دارد و لذا از این منظر در سال‌های اخیر برای ساخت بسیاری از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری از این نوع رزین استفاده شده‌است. رزین اپوکسی به‌دلیل ویژگی‌های خاصی مثل استحکام و مقاومت به خزش مناسب، چسبندگی مناسب به بسیاری از مواد، ویسکوزیتهٔ پایین و انقباض کم در هنگام انجماد، از جمله موادی است که طی سال‌های اخیر برای ساخت بسیاری از ساختارهای کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته‌است. از این جمله می‌توان کاربردهایی هم‌چون ساخت کشتی‌ها، کاربردهای هوافضا و اتومبیل‌سازی را نام برد [6].

تقویت‌کننده‌ها در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری می‌توانند از منابع تجدیدپذیر و طبیعی مثل الیاف گیاهی (الیاف چوب یا برگ و..)، الیاف حاصل از چوب‌های بازیافتی یا کاغذهای ضایعاتی، محصولات جانبی حاصل از تولید غلات، ضایعات کشاورزی و... یا الیاف مصنوعی و دست‌ساز هم‌چون آرامید، کربن و شیشه باشد. در کامپوزیت‌ها، الیاف سبب افزایش سختی و استحکام می‌شوند و هم‌چنین خواص نهایی فاز زمینه را بهبود می‌دهند [2].

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف اصولاً بستگی دارد به استحکام الیاف تقویت‌کننده، پایداری شیمیایی، استحکام زمینه و اتصال قوی و خوب بین الیاف تقویت‌کننده و زمینهٔ کامپوزیت که انتقال‌دهندهٔ تنش اعمالی بین زمینه و الیاف تقویت‌کننده است. ترکیب و جهت‌گیری مناسب الیاف تقویت‌کننده می‌تواند سبب ایجاد خواص مکانیکی مناسب در کامپوزیت شود و عملکرد آن‌ها را تا سطح فولاد افزایش دهد و سختی آن را تا سطح آلومینیوم بالا آورد [7].

رشد استفاده از الیاف شیشه‌ای به‌دلیل قیمت و دانسیتهٔ پایین و مقاومت دمایی بالای این فیبرها، در انواع زمینه‌های پلیمیری به‌عنوان تقویت‌کننده در سال‌های اخیر بالا بوده‌است [8]. الیاف شیشهٔ مورد استفاده به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ پلیمرها به سه دسته شیشهٔ نوع E، الیاف شیشه با استحکام بالا (HS) و الیاف شیشهٔ مقاوم در برابر خوردگی (CR) تقسیم می‌شوند. برای اولین‌بار از شیشهٔ نوع E به‌صورت عمده به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینهٔ پلیمیری و در کاربردهای نیازمند به

عایق‌های الکتریکی استفاده شد. این نوع از الیاف شیشه بیش‌ترین استفاده را به‌عنوان تقویت‌کننده داشته‌است. مهم‌ترین دلیل این موضوع را می‌توان قیمت پایین این ماده و توسعۀ این الیاف پیش از سایر انواع الیاف شیشه عنوان کرد [9].

از طرفی امروزه استفاده از ذرات بسیار کوچک با توان ایجاد تغییرات بزرگ، تحت عنوان تکنولوژی استفاده از نانوذرات، علم مهندسی را بسیار تحت تأثیر قرار داده‌است. یکی از این مواد، نانوذرات رس است که از لحاظ قیمتی نیز نسبت‌به بسیاری از مواد نانومتری دیگر، مناسب‌تر است و خواص مکانیکی و مقاومت به سایش قابل توجهی نیز دارد [10].

تاکنون ساخت کامپوزیت‌های هیبرید شامل زمینۀ اپوکسی حاوی نانوذرات رس و فیبرهای شیشه در چندین پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌است [1,6,8,10,11]. A. Thiagarjan et. Al. نشان داد که با افزایش ۳ در صد وزنی نانوذرات رس، استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه حدود ۳۰ در صد افزایش دارد [12]. با این وجود در ساخت این کامپوزیت‌ها عمدتاً از روش‌هایی با قیمت بالا برای مخلوط کردن ذرات نانو (هم‌چون التراسونیک [13] و High Shear Mixer (HSM) [10]) در زمینه استفاده شده‌است. این مسئله سبب شده یکی از ویژگی‌های مهم اپوکسی، الیاف شیشه و نانوذرات رس که قیمت مناسب آن‌ها است، تحت تأثیر قرار بگیرد و عملاً این ویژگی از بین برود.

نانولوله‌های کربنی نیز با دارا بودن خواص ویژۀ الکتریکی، حرارتی و مکانیکی، امروزه به‌عنوان یکی از مواد نوین مورد توجه برای ساخت بسیاری از کامپوزیت‌ها هستند [14,15]. A. Rahaman و M. Imran نشان دادند که مقاومت برشی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه با افزودن نانولولۀ کربنی به‌میزان ۰,۵ در صد حدود ۲۷ در صد افزایش خواهد یافت [16].

مهم‌ترین چالش در ساخت کامپوزیت زمینه اپوکسی با نانوذرات، پخش یک‌نواخت ذرات در زمینۀ پلیمری است [15]. پخش یک‌نواخت نانوذرات درجهت رسیدن به بیش‌ترین سطح تماس است، به‌گونه‌ای که تنش به‌صورت مؤثری از زمینۀ ضعیف به نانوذرات مستحکم منتقل شود. انتقال مؤثر تنش بین نانوذرات/ پلیمر، مهم‌ترین عامل در دست‌یابی به خواص بهبودیافته در این نوع کامپوزیت‌ها است؛ لذا فرایند تولید که تأثیری تعیین‌کننده در نحوه و میزان توزیع نانوذرات دارد، از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در خواص کامپوزیت خواهد بود.

در این پژوهش تأثیر اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به زمینه همراه با نانوذرات رس و بدون نانوذرات رس مورد بررسی قرار گرفته‌است. هدف از این عمل مقایسه بین خواص و احتمال بهبود آن‌ها در نتیجۀ افزودن این ذرات در فرایند تولیدی با قیمت مناسب (اختلاط مکانیکی با هم‌زن ساده) است.

روش تجربی

مواد اولیۀ مورد استفاده در این پژوهش شامل اپوکسی بیسفنل A از نوع گران‌روی متوسط به‌عنوان رزین، عامل پخت HA205 به‌عنوان عامل ایجاد اتصالات عرضی، پارچۀ بافته شده (Woven roving or Woven cloth) از شیشۀ نوع E، نانورس و نانولولۀ کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده‌ها است. مشخصات مواد مورد استفاده در

جدول ۱) نشان داده شده‌است. جدول ۲) نشان‌دهندۀ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پارچۀ شیشه‌ای بافته شده و نانوذرات رس مورد استفاده است.

به‌منظور ساخت نمونه‌ها رزین و عامل پخت به نسبت وزنی ۵۵ به ۱۰۰ مخلوط می‌شوند، سپس نانوذرات با درصدهای وزنی متفاوت به مخلوط اضافه می‌گردند و به‌مدت ۱ دقیقه مخلوط نهایی با هم‌زن مکانیکی ساده با سرعت ۳۰۰-۴۰۰ rpm هم‌زده می‌شود و به الیاف از پیش بریده شده و روی هم قرار گرفته مالیده می‌شود. سپس تمامی نمونه‌ها به‌مدت ۰/۵ ساعت در دمای ۷۰^{0}C و با فشار ۲۶ $Kg/_{m^2}$ تحت فشار پخت می‌شوند.

جدول ۱ مشخصات مواد مورد استفاده برای تولید کامپوزیت‌ها

ماده	کد تجاری	تولیدکننده
اپوکسی بیسفنل A	EPIKOTE 828	Gena عربستان سعودی
سخت‌کننده HA205	EPIKURE F205	Gena عربستان سعودی
نانورس	Cloisite 30b	Southern Clay
الیاف شیشه	EW100	Hitex – چین
نانولولۀ کربنی	MWCNT	پژوهشگاه صنعت نفت

جدول ۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی پارچۀ شیشۀ بافته‌شده و نانوذرات رس مورد استفاده

خواص پارچۀ شیشۀ بافته‌شده		
EW100		Style
Plain		Weave
20		Warp (Ends/cm)
17		Fill (Ends/cm)
EC9 24 1/2		Warp Yarn
EC9 24 1/1		Fill yarn
100		Weight (gram/m2)
0.1		Thick
500		Strength $^{N}/_{5\ Cm}$
600		
۳/٤ تا ۳/٥		UTS در دمای اتاق
٤/٥ تا ٥		کرنش شکست
٦٥ تا ٧٥		مدول یانگ
٢٨ تا ٣٢		مدول برشی
۰/۲۰۰۰		نسبت پواسون
۳/٤ تا ۳/٥		UTS در دمای اتاق
خواص نانو ذرات رس		
وزن مخصوص	–	1.98 $^{g}/_{cc}$
چگالی	Loose	0.2283 $^{g}/_{cc}$
	Packed	0.3638 $^{g}/_{cc}$
اندازۀ ذرات	٪۱۰	≤ 2.00µm
	٪٥۰	≤ 6.00µm
	٪۹۰	≤ 13.00µm
سختی (Shore D)		83
استحکام کششی		101 MPa
ازدیاد طول در نقطۀ شکست		8.00%
مدول الاستیک		4.657 GPa
مدول خمشی		3.78 GPa

ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در آزمون استحکام خمشی براساس استاندارد ASTM D790 که مورد استفاده قرار گرفت، ۱۲۷×۱۲,۷ میلی‌متر و با ارتفاع ۳ میلی‌متر بود. هم‌چنین براساس استاندارد ASTM D2344 که برای بررسی استحکام برشی بین لایه‌ای مورد استفاده قرارگرفت، ابعاد نمونه‌های ساخته‌شده برای انجام این تست ٤۰×۱۲ میلی‌متر و با ارتفاع ٦ میلی‌متر بودند.

مشخصات نمونه‌های مورد بررسی و علائم اختصاری انتخاب‌شده برای هر نمونه به‌منظور نمایش بهتر در نمودارها، در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

جدول ۳ میزان و نوع نانوذرات مورد استفاده در زمینۀ نمونه‌های مختلف

نام نمونه	درصد نانورس	درصد نانولولۀ کربنی
0	0	0
5 NC	0.5	0
10 NC	1	0
15 NC	1.5	0
20 NC	2	0
25 NC	2.5	0
5 NT	0	0.5
5 NC-5 NT	0.5	0.5

پس از فراآیند ساخت، براساس استانداردهای ASTM D2344 و ASTMD790 استحکام برشی بین لایه‌ای (Interlaminar Shear Strength) و خواص خمشی کامپوزیت‌ها، بااستفاده از دستگاه تست کشش Zwick/Roel و مدل Z100 مورد بررسی قرار گرفت. طبق الزامات استاندارد ASTM D2344 باید حداقل تعداد ٥ تست روی نمونه‌ها انجام شود. البته در این تحقیق به‌دلیل دقت بیشتر روی بعضی از نمونه‌ها تا ۷ تست نیز انجام شد؛ لذا تعداد ٤۳ عدد نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

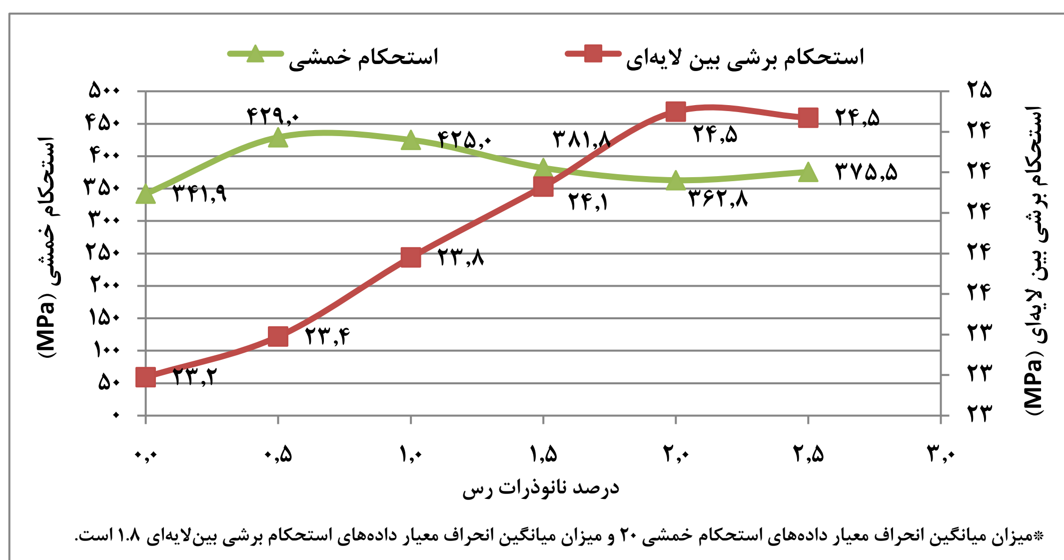
در انتها سطوح شکست نمونه‌ها نیز به‌منظور بررسی مکانیزم و مورفولوژی شکست بااستفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل CAM SCAN MV2300 از شرکت Electron Optic Services (EOS) ساخت کشور کانادا، مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

شکل (۱) نشان‌دهندهٔ استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی در این پژوهش است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش نانوذرات رس تا حد ۰/۵ درصد وزنی سبب بهبود مقاومت خمشی نمونه به‌اندازهٔ ۲۵ درصد می‌شود؛ اما افزایش بیش‌تر نانوذرات رس نتیجهٔ معکوس دارد و استحکام خمشی کاهش می‌یابد و پس از تقریباً ۱/۵ درصد نانوذرات رس، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. دلیل این مسئله به نحوهٔ پخش ذرات در زمینه باز می‌گردد. نانوذرات به‌دلیل بالا بودن سطح ویژه (Specific Surface Area) انرژی سطحی بالایی دارند و لذا تمایل زیادی به آگلومره شدن دارند [17]. به عبارت دیگر، به‌دلیل بالا بودن سطح ویژهٔ نانوذرات، آن‌ها تمایل به آگلومره شدن و ایجاد مجموعه‌های متصل به همدیگر را دارند. نیروهای واندروالسی ذرات را به هم متصل می‌کند و از خوب پخش شدن آن‌ها (که یکی از مهم‌ترین عوامل در اثرگذاری حداکثری نانوذرات در کامپوزیت‌ها است) جلوگیری می‌کند.

تمایل به آگلومره شدن سبب افزایش ویسکوزیتهٔ مخلوط رزین/ نانوذره می‌شود، که این مسئله درمورد نانولولهٔ کربنی شدت بیشتری دارد؛ به‌گونه‌ای که در برخی مقالات، استفادهٔ بیش از ۰/۵ درصد وزنی نانولولهٔ کربنی را مناسب نمی‌دانند و کاهش خواص را به افزایش ویسکوزیته نسبت می‌دهند [18]. افزایش ویسکوزیته سبب خوب پخش نشدن نانوذره در زمینهٔ رزین و به دام افتادن حباب‌های ایجادشده از فرآیند اختلاط خواهد شد. بر همین اساس نیز برخی از پژوهش‌ها روش قالب‌گیری انتقالی رزین با کمک خلأ را پیشنهاد داده‌اند. در این روش به‌دلیل استفاده از خلأ حباب‌های ایجادشده حین اختلاط نانوذره و رزین حذف می‌شوند و نتیجهٔ بهتری به‌دست می‌آید [19]. تمایل به آگلومره شدن و افزایش ویسکوزیتهٔ رزین از جمله عوامل ایجاد انحراف معیار در نتایج به‌دست‌آمده و نشان داده‌شده در شکل (۱) است. آگلومره شدن و افزایش ویسکوزیتهٔ رزین سبب عدم پراکندگی یکنواخت ذرات در زمینه می‌شود و درنتیجه خواص مکانیکی نمونه‌ها نیز پراکندگی نشان خواهند داد.

در پژوهش مشابهی که از روش هم‌زن التراسونیک و قالب‌گیری تزریقی بااستفاده از خلأ انجام شده بهترین نتیجهٔ به‌دست‌آمده برای استحکام خمشی در ۳ درصد وزنی نانورس حدود ۲۰۷ مگاپاسکال بوده‌است [20]. در پژوهش حاضر بهترین نتیجهٔ به‌دست‌آمده در ۰/۵ درصد وزنی و برابر با ۴۲۹ مگاپاسکال بوده‌است.

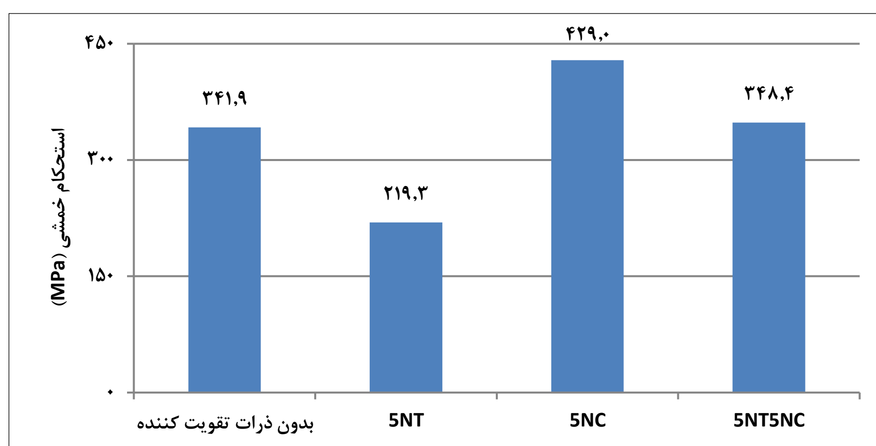


شکل ۱ استحکام خمشی و استحکام برشی بین‌لایه‌ای در نمونه‌ها با افزایش نانوذرات رس

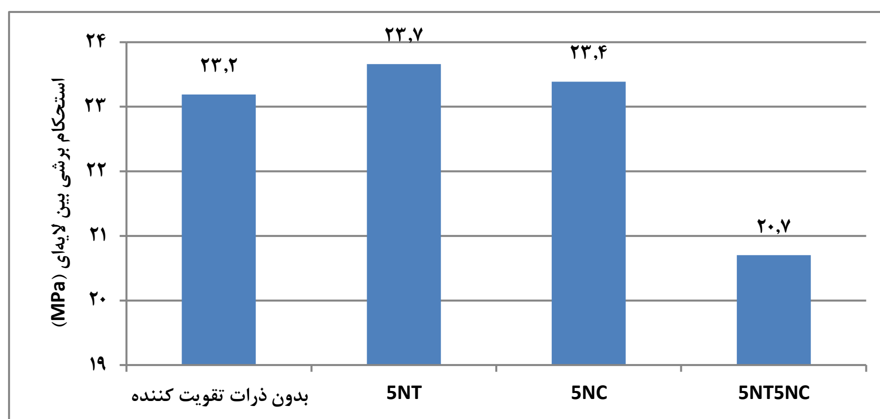
افزایش استحکام برشی بین لایه‌ای در درجهٔ اول به افزایش استحکام زمینه با افزودن نانوذرات مربوط است. نانوذرات در زمینه دربرابر رشد ترک به‌عنوان مانع عمل می‌کنند و سبب افزایش استحکام برشی خواهند شد؛ بدین معنی که ترک در حین مسیر رشد خود با نانوذره برخورد می‌کند و مجبور به تغییر جهت و یا توقف تا زمان رسیدن به سد انرژی لازم می‌شود. در درجهٔ دوم ایجاد فصل مشترک بهتر بین نانوذرات و الیاف شیشه نیز می‌تواند سبب بهبود خواص شود. چسبندگی نانوذره به الیاف، انرژی لازم برای شکست را افزایش خواهدداد.

نکتهٔ قابل توجه در این تحقیق اثر معکوس افزایش نانولولهٔ کربنی به کامپوزیت اپوکسی/شیشه برروی استحکام خمشی این کامپوزیت و کاهش آن است (شکل ۲). افزایش ۰/۵ درصدی نانولولهٔ کربنی سبب افت حدود ۳٦ درصدی در استحکام خمشی نسبت‌به نمونهٔ بدون ذرات تقویت‌کننده خواهد شد. این تأثیر منفی در نمونهٔ حاوی ۰/۵ درصد نانوذرات رس نیز مشاهده می‌شود و افزایش ۰/۵ درصد نانولولهٔ کربنی سبب کاهش حدود ۱۹ درصدی استحکام خمشی نمونهٔ 5NT5NC نسبت‌به نمونهٔ 5NC خواهد شد.

با این وجود، استحکام برشی بین‌لایه‌ای شکل (۳) در کامپوزیت اپوکسی/شیشه با افزودن ۰/۵ درصد نانولولهٔ کربنی اندکی افزایش می‌یابد، اما در نمونهٔ 5NT5NC افت خواص (نسبت‌به نمونه‌های 5NT، 5NC و نمونهٔ بدون تقویت‌کننده) همچنان به‌صورت قابل توجهی قابل مشاهده است به‌گونه‌ای که استحکام برشی بین‌لایه‌ای بیش از ۱۱ درصد، نسبت‌به نمونهٔ 5NC کم‌تر است.



شکل ۲ استحکام خمشی نمونه‌های 5NT، 5NC، 5NT5NC در مقایسه با نمونهٔ بدون تقویت‌کننده

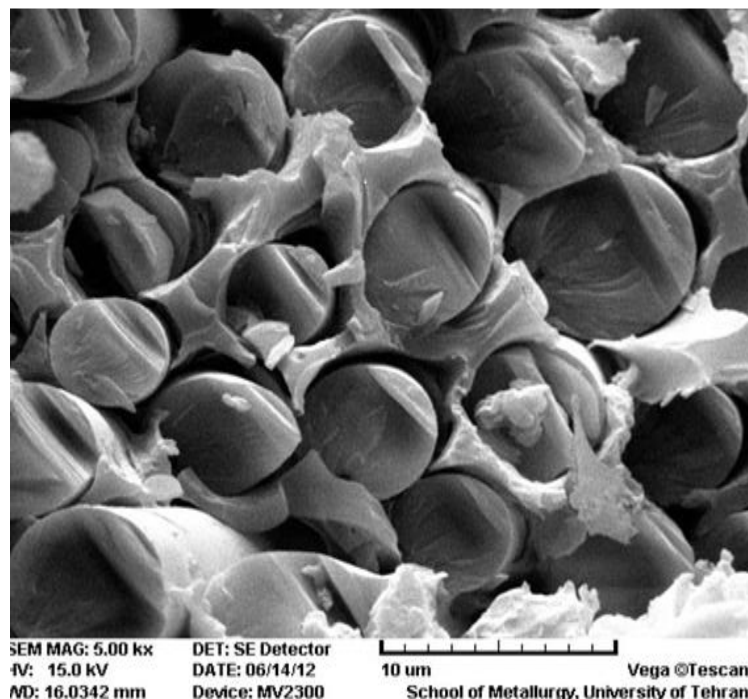


شکل ۳ استحکام برشی بین لایه‌ای نمونه‌های 5NT، 5NC، 5NT5NC در مقایسه با نمونهٔ بدون تقویت‌کننده

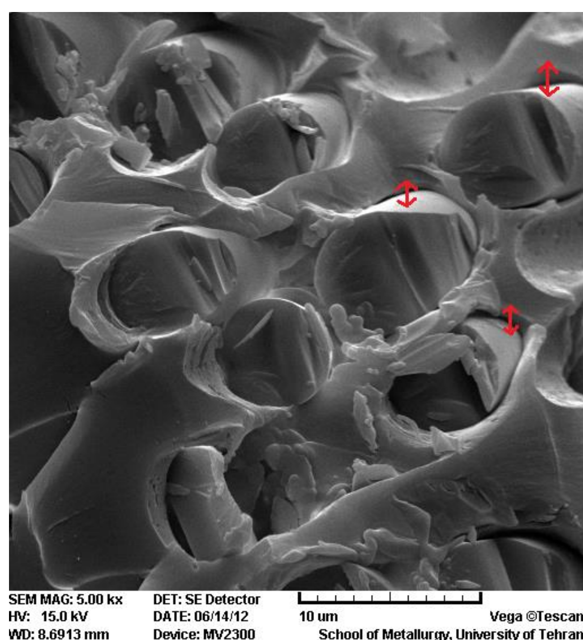
شکل (٤) تا شکل (٦) نشان‌دهندهٔ ریزساختار سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی 0، 5NC و 5NT است. همان‌گونه که مشخص است فاصلهٔ بین زمینه و الیاف بعد از شکست در این نمونه‌ها متفاوت است، به‌گونه‌ای که در نمونهٔ بدون نانوذرات شکل(٤) بیش‌ترین مقدار و در نمونهٔ حاوی ۰/۵ درصد نانولولهٔ کربنی شکل(۵)، کم‌ترین مقدار است. فاصلهٔ بالای بین زمینه و الیاف در نمونهٔ بدون ذرات تقویت‌کننده، که از چسبندگی پایین رزین و الیاف شیشه ناشی می‌شود، سبب افت استحکام کامپوزیت خواهد شد. از طرف دیگر همان‌گونه که درشکل (۵) ملاحظه می‌شود در نمونهٔ 5NT میزان چسبندگی رزین حاوی نانولوله‌های کربنی چندلایه به الیاف بسیار بالا است، به‌گونه‌ای که فاصله بین الیاف و رزین (فلش‌های نشان داده‌شده درشکل (۵) در سطح شکست، بسیار اندک است.

چسبندگی بالای رزین به الیاف سبب می‌شود در حین خم شدن، زمینهٔ اطراف الیاف اجازهٔ هیچ تغییر فرمی نداشته باشد و دچار شکست ترد شود. از طرف دیگر چسبندگی پایین رزین و الیاف سبب می‌شود استحکام الیاف به زمینه منتقل نشود و به عبارتی کارکرد اصلی کامپوزیت که استفادهٔ هم‌زمان از خواص خوب تقویت‌کننده و زمینه در آن واحد است، رخ نخواهد داد (یا به اندازهٔ کافی رخ نخواهد داد). به همین دلیل چسبندگی مناسب و بهینهٔ زمینه و الیاف می‌تواند بهترین نتایج را ارائه دهد. این مسئله به‌خوبی درمورد نمونهٔ 5NC قابل مشاهده است (فلش‌های نشان داده‌شده در شکل ٦- الف).

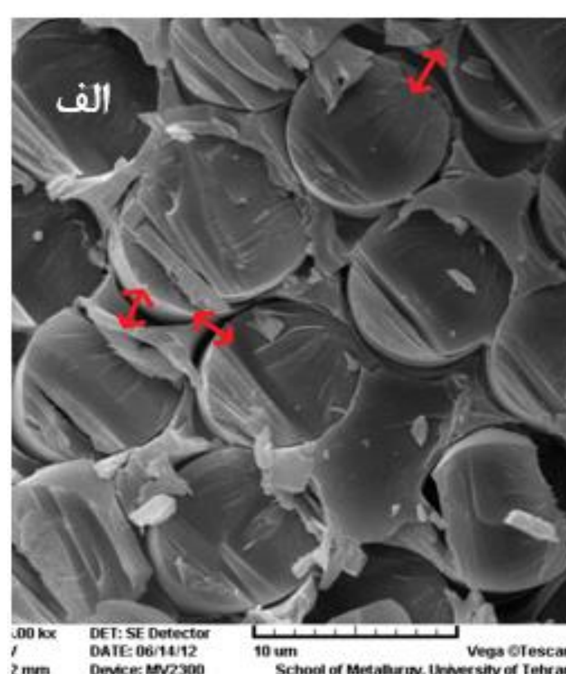
در الیاف شکسته‌شدهٔ نمونه‌های بدون نانورس، سطح الیاف کاملاً تمیز و عاری از ذرات پلیمر و الیاف خردشده هستند و الیاف جداشده از کامپوزیت آغشته به رزین نیستند؛ اما در نمونه‌های حاوی نانوذرات رس، سطح الیاف با لایه‌ای از رزین مخلوط‌شده با نانورس پوشیده شده‌است و رزین به‌طور محکم به الیاف چسبیده‌است شکل (٦- ب) و سطح شکست نیز زبرتر است. این موضوع یکی از دلایل بهبود در خواص کامپوزیت است. این نکته توسط Yuan Xu و همکارانش نیز تأیید شده‌است [21].

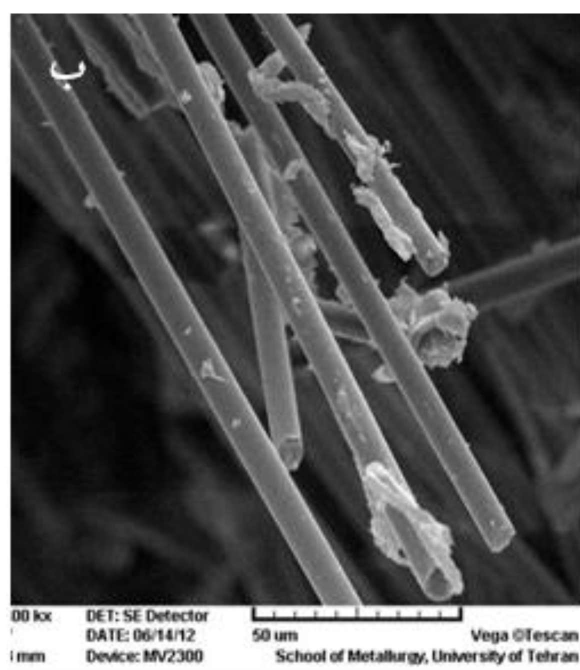


شکل ٤ سطح مقطع شکست نمونهٔ بدون ذرات تقویت‌کننده



شکل ۵ سطح مقطع شکست نمونهٔ حاوی ۰/۵ درصد نانولولهٔ کربنی





شکل ٦ (الف) سطح مقطع شکست، (ب) الیاف شکسته‌شده در نمونهٔ حاوی ۰/۵ درصد نانوذرات رس

هم‌چنین عیبی مانند پوک بودن نانولوله‌های کربنی نیز در نتایج بسیار مؤثر است. به‌دلیل ضعیف بودن جاذبه بین لایه‌ای (پیوندهای واندروالس) بین صفحات تشکیل‌دهندهٔ نانولولهٔ کربنی، فقط لایهٔ خارجی نانوله نقش تقویت‌کنندهٔ مکانیکی را بازی می‌کند که با شرایط شبیه‌سازی تئوری بسیار متفاوت است.

براساس استاندارد ASTM D790، مدول الاستیک خمشی طبق فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$E_B = L^3m/4bd^3$$

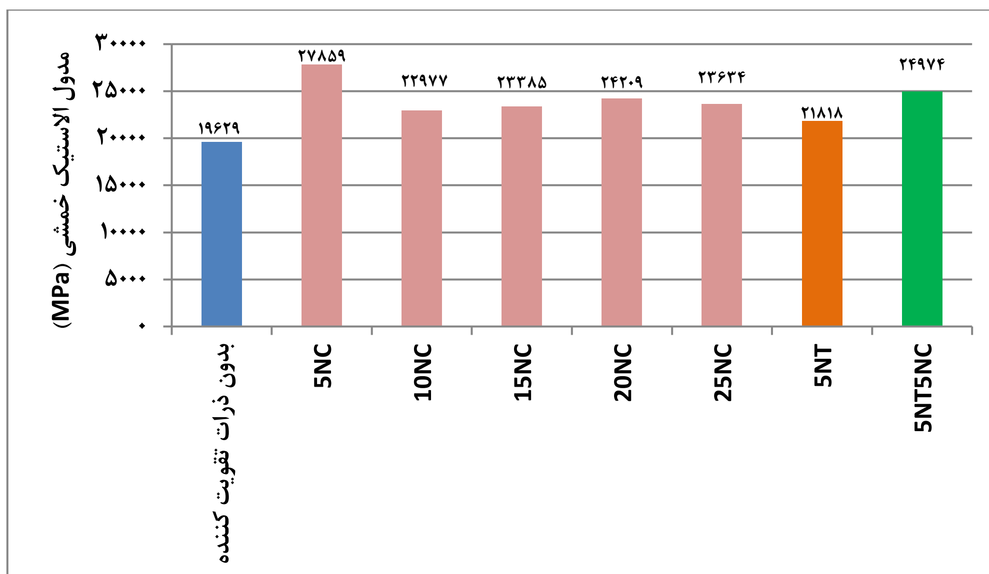
که در آن E_B مدول الاستیک خمشی (MPa)، L فاصلهٔ دو تکیه‌گاه زیرین نمونه حین تســت (mm)، b عرض نمونه (mm)، d ضــخامت نمونه (mm)، m شـیب قسـمت صـاف نمودار نیرو- جابه‌جایی (N/mm) که از دســتگاه اســتخراج می‌شــود. نتایج این محاســبات برای تمامی نمونه‌های مورد بررسی در شکل (۷) ارائه شده‌است.

افزایش مقدار نانوذرات همراه با پخش‌شوندگی مناسب باعث افزایش پیوند و چسبندگی بین سطحی ذرات نانو و زمینهٔ پلیمیری‌شده که موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیرهای پلیمری هنگام بارگذاری می‌شود. نتیجهٔ این امر افزایش مدول الاستیک نانو کامپوزیت هیبرید است.

باتوجه نتایج به‌دست‌آمده در این حالت نیز نمونهٔ 5NC بهترین ویژگی را از خود نشان می‌دهد(شکل ۷). باید توجه داشت بهبود مدول الاستیک از جمله مهم‌ترین مواردی است که سبب توسعهٔ کاربردهای یک ماده خواهد شد. با افزایش ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات رس به اپوکسی و تنها به‌وسیلهٔ اختلاط مکانیکی ساده، حدود ۴۲ درصد افزایش در مدول الاستیک خمشی کامپوزیت (اپوکسی+ نانورس)/ الیاف شیشه نسبت‌به کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه، مشاهده می‌شود.

این مسئله امکان ساخت ارزان قیمت این نوع کامپوزیت در کنار بهبود خواص آن را به‌صورت همزمان، تأیید می‌کند. اتصال خوب بین ذرات نانورس با زمینهٔ اپوکسی دلیل این افزایش در مدول الاستیک خمشی است. در حالت کلی نیز افزودن ذرات سبب می‌شود، بخشی از بار اعمالی توسط آن‌ها تحمل شود و لذا مدول الاستیک در تمام کامپوزیت‌های هیبرید تولیدی از کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بیش‌تر باشد. این مسئله در نتایج به‌دست‌آمده توسط Olusanya و همکاران [11] نیز مشاهده شده‌است. براساس نظر Olusanya و همکاران در هر گروه از نانوکامپوزیت‌ها که فقط از یک نوع نانوذره استفاده شده‌است، خواص مکانیکی پس از درصد وزنی مشخصی کاهش می‌یابد. این موضوع در پژوهش حاضر نیز با افزودن نانورس بیش از ۰/۵ درصد وزنی رخ داد که به‌دلیل آگلومره شدن و ایجاد ناخواستهٔ کلوخه‌های میکرومتری است. ذرات آگلومره برهم کنش کمتری با زمینهٔ پلیمیری دارند و قابلیت کم‌تری برای انتقال تنش دارند.

هم‌چنین افزایش همزمان دو نوع نانوذره امکان ایجاد آگلومره را افزایش می‌د هد و بـنابراین کاهش در مدول الاستیک خمشی نیز رخ خواهد داد.



شکل ۷ مدول الاستیک خمشی محاسبه‌شده برای نمونه‌های مختلف

نتیجه‌گیری

۱. افزودن ۰/۵٪ وزنی نانورس به زمینهٔ اپوکسی در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، استحکام خمشی را به‌میزان ۲۵٪ افزایش داد و از ۳۴۲ به ٤۲۹ مگاپاسکال رساند؛ اما افزایش بیش‌تر نانورس نتیجهٔ معکوس دارد به‌طوری‌که استحکام خمشی کاهش می‌یابد و پس از حدود ۱/۵ درصد تقریباً ثابت باقی می‌ماند. افزودن نانولولهٔ کربنی به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه یا اضافه‌کردن نانولولهٔ کربنی و نانورس به‌صورت هم‌زمان اثر منفی برروی استحکام خمشی دارد. این مسئله ناشی از تغییر میزان چسبندگی زمینه به الیاف شیشه و ویسکوزیتهٔ رزین است که نهایتاً سبب تغییر فاصلهٔ بهینه بین زمینه و الیاف می‌شود.

۲. استحکام برشی بین لایه‌ای با افزودن نانوذره افزایش می‌یابد. استحکام برشی بین لایه‌ای نمونهٔ حاوی ۲٪ نانو رس بیشترین مقدار است و حدود ۵٪ افزایش نشان می‌دهد و به ٢٤,٥ مگاپاسکال رسید؛ اما با افزودن نانولوله افزایش جزئی (۲٪) مشاهده می‌شود. این مسئله به‌دلیل پخش‌شوندگی بهتر ذرات نانورس در زمینه نسبت‌به نانولوله‌های کربنی است. نانولوله‌های کربنی به‌دلیل تمایل بیش‌تر به آگلومره شدن پخش‌شوندگی مناسبی را باتوجه به روش اختلاط استفاده‌شده در این پژوهش ندارند و هم‌چنین سبب افزایش ویسکوزیتهٔ زمینه خواهند شد.

۳. افزودن هم‌زمان نانورس و نانولولهٔ کربنی نیز تا حدی سبب افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود؛ اما به‌دلیل تمایل دو نانوذره به جذب سطحی و آگلومره شدن، این افزایش بسیار کم‌تر از نمونهٔ حاوی نانوذرات رس است.

٤. استفاده از روش تولید مورد بررسی در این پژوهش به‌عنوان روشی ارزان و در دسترس برای تولید در مقیاس بالا، نتایج خوبی را به‌همراه داشت؛ لذا می‌توان با بهینه کردن برخی شرایط (هم‌چون قدرت و سرعت هم‌زن مکانیکی، فشار پرس، زمان و...) بااستفاده از این روش، خواص کامپوزیت‌های اپوکسی/ شیشهٔ مورد نیاز برای بسیاری از صنایع را با قیمت مناسب و تنها با افزودن اندکی ذرات نانوذرات رس بهبود داد و این کامپوزیت‌ها را در مقیاس بالا تولید نمود. با این وجود استفاده از این روش برای پخش کردن نانولوله‌های کربنی در زمینهٔ اپوکسی به‌دلیل تمایل بالای این مواد به آگلومره شدن و در نتیجه بالارفتن ویسکوزیتهٔ زمینه، توصیه نمی‌شود.

مراجع

1. Sharma, B. K., Sharma., G., Rahaman, A., "Mechanical and Thermal Properties of Nanoclay/Glass Fiber/Epoxy Laminated Composite", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 04, pp. 3116-3119, (2017).
2. Thakur V. K., Thakur M. K., Pappu A., "Hybrid Polymer Composite Materials", Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 57-82, (2017).
3. Guolong Wang, Demei Yu, Ajit D.Kelkar, Lifeng Zhang, "Electrospun Nanofiber: Emerging Reinforcing Filler in Polymer Matrix Composite Materials", *Progress in Polymer Science*, Vol. 75, pp. 73-107, (2017).
4. Meyers R. A.,"Encyclopedia of Physical Science and Technology", *Academic Press*, Inc., Cambridge, pp. 455-468, (2003).
5. Shalin, R. E., "Polymer Matrix Composites", *Chapman & Hall*, London, pp. 1-86, (1995).
6. Sivasaravanana, S., BupeshRajab, V. K., Manikandanc, "Impact Characterization of Epoxy LY556/E-Glass Fibre/Nano Clay Hybrid Nano Composite Materials", *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 968-974, (2014).
7. Sathishkumar, TP., Satheeshkumar, S., and Naveen, J., "Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites- A

Review", *Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 13, pp.1258-1275, (2014).

8. Singh, S. K., Singh, S., Sharma, S., Sharma, V., "Strenghth Degradation of Mechanical Properties of Unidirectional E-Glas Fiber Epoxi Resin Nanoclay Composites under Hydrothermal Loading Condition", *Procedia Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 113-119, (2014).
9. Zweben, C. H., "Composites: Overview", In *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, Elsevier Academic Press, Cambridge, pp.192-208, (2005).
10. Rafiq, A., Merah, N., Boukhili, R., Al-Qadhi, M., "Impact Resistance of Hybrid Glass Fiber Reinforced Epoxy/Nanoclay Composite", *Polymer Testing*, Vol. 57, No. 1, pp. 1-11, (2017).
11. Olusanya, J., Kanny, K., Singh, Sh., "Bulk Cure Study of Nanoclay Filled Epoxy Glass Fiber Reinforced Composite Material", *Jornal of Polymer Engineering*, Vol. 37, No. 3, pp. 247-259, (2016).
12. Thiagarajan, A., Kaviarasan, K., Vigneshwaran, R., Venkatraman, K. M., "The Nano Clay Influence on Mechanical Properties of Mixed Glass Fibre Polymer Composites", *International Journal of ChemTech Research*, Vol. 6, No. 3, pp. 1840-1843, (2014).
13. Karippal, J. J., Murthyl, H. N., Rai, K. S., Sreejith1, M., Krishna, M., "Study of Mechanical Properties of Epoxy/Glass/Nanoclay Hybrid Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 45 (18), pp. 1893-1899, (2016).
14. Zeiler, R., Kuttner, C., Khalid, U., Kothmann, M. H., Dijkstra, D. J., Altstadt, V., "The Role of Multi-Walled Carbon Nanotubes in Epoxy Nanocomposites and Resin Transfer Molded Glass Fiber Hybrid Composites: Dispersion, Local Distribution, Thermal, and Fracture/Mechanical Properties", *Polymer Composites*, Vol. 38 (9), pp. 1849-1863, (2015).
15. Rathore D. K., Prusty R. K., Kumar D. S., Ray B. C., "Mechanical Performance of CNT-Filled Glass Fiber/Epoxy Composite in In-Situ Elevated Temperature Environments Emphasizing the Role of CNT Content", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 84, pp. 364-376, (2016).
16. Rahaman, A., Imran, M., "Epoxy-Carbon Nanotubes as Matrix in Glass Fiber Reinforced Laminated Composites", *Nanotubes and Carbon Nanostructures*, Vol. 25, pp. 559-562, (2017).
17. Paul, D. R., and Robeson, L. M., "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites". *Polymer*, Vol. 49 (15), pp. 3187-3204, (2008).
18. Gojny, F. H., et al., "Influence of Nano-Modification on the Mechanical and Electrical Properties of Conventional Fibre-Reinforced Composites", *Composites: part A*, Vol. 36 (11), pp. 1525-1535, (2005).
19. Wichmann, M. H. G., et al., "Glass-Fibre-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Electrical Properties– Benefits and Limitation of a Nanoparticle Modified Matrix", *Engineering Fracture Mechanics.* Vol. 73 (16), pp. 2346-2359, (2006).
20. Hoseini, S. A., Pol, M. H., "Investigation of the Tensile and the Flexural Properties of the Glass/Epoxy Composites Reinforced with Nanoclay Particles", *Modares Mechanical Engineering (Persian)*, Vol. 14 (7),

pp.103-108, (2014).

21. Xu, Y., Van Hoa, S., "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy/Clay Nanocomposites". *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 854-861, (2008).